

Kurzfassung zur Dissertation „Innovative Desinfektionsverfahren zur Brauchwassergewinnung in der dezentralen Abwasserbehandlung - Elektrolyse und UV/Elektrolyse-Hybridtechnik“

Nach Schätzung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) werden im Jahr 2025 voraussichtlich 1,8 Milliarden Menschen in Ländern oder Regionen mit absolutem Wasserstress leben. Nicht nur in Regionen der ariden und semiariden Klimazone, sondern auch in schnell wachsenden Megastädten rund um den Globus erhöht sich der Druck auf die vorhandenen Wasserressourcen, was unter anderem durch ein verändertes Ernährungs- und Konsumverhalten (Erhöhung des Lebensstandards) verursacht wird. In den Schwellen- und Entwicklungsländern der semiariden und ariden Klimazone werden über 90 % des jährlichen Wasserverbrauchs zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen aufgewendet, um die Ernährung der Bevölkerung sicherzustellen. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts rückt daher die geplante/geregelte Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser verstärkt in den Fokus eines nachhaltigen Wasserressourcenmanagements. Abwasser stellt hinsichtlich seiner Zusammensetzung (Nährstoffe P, N zur Bodendüngung) und seiner zuverlässigen, witterungsunabhängigen Verfügbarkeit eine wertvolle Ressource in jedem Haushalt dar. Durch die Etablierung eines sekundären Brauchwasserkreislaufs kann die Effizienz der Wassernutzung gesteigert werden. Deshalb fokussieren sich Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gegenwärtig mehr auf dezentrale und semizentrale Konzepte, da dessen Strukturen bessere Voraussetzungen zur Etablierung von Kreislaufsystemen liefern und sich Innovationen in der Abwassertechnik erheblich einfacher umsetzen lassen.

Generell orientieren sich die hygienischen Qualitätsanforderungen für die Abwasserwiederverwendung an der geplanten Nutzung. Diese wiederum sind anhand von unterschiedlichen Grenz- bzw. Richtwerten für z. B. Fäkalindikatorbakterien (z. B. Fäkalcoliforme: *E. coli*) in länderspezifischen Normen und Rechtsvorschriften geregelt. In Deutschland wird seit 2005 die Zusatzklasse +H im Kleinkläranlagenbereich nach den Grundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vergeben, wenn der Ablauf weniger als 100 Fäkalcoliforme (*E.coli*) pro 100 mL enthält. Dies ermöglicht die gefahrlose Versickerung des Abwassers in Karst- und Wasserschutzgebieten. Da Abwasser selbst nach mechanisch-biologischer Reinigung eine Vielzahl von Pathogenen enthält, sind gezielte Maßnahmen zu deren Reduzierung unabdingbar. Die Ansprüche an Desinfektionsverfahren zur Gewinnung von Brauchwasser sind durchaus komplex. So sollten diese über eine hohe und zuverlässige Desinfektionseffizienz bei geringer bzw. moderater Bildung von unerwünschten Desinfektionsnebenprodukten verfügen. Das erzeugte Brauchwasser sollte eine ausreichende Lagerfähigkeit aufweisen. Zudem sollte das Verfahren ohne externe (gelagerte) Chemikalien auskommen und technisch einfach, skalierbar, platzsparend und wartungsarm sowie unter Realisierung moderater Investitions- und Betriebskosten zu betreiben sein. Bestehende Verfahren zur de-

zentralen Abwasserdesinfektion basieren überwiegend auf der Membrantechnik und UV-Bestrahlung, die derzeit jedoch nur unter hohen Betriebskosten (hoher Wartungs- und Reinigungsaufwand) sicher betrieben werden können. Zudem erweisen sich die hohen Investitionskosten bei der Membranfiltration als nachteilig. Des Weiteren können beide Verfahren kein Wirkdepot bereitstellen. Daher besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung und Erprobung von alternativen Desinfektionsverfahren. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der kumulativ erstellten Dissertation die Anwendbarkeit der Elektrolyse und UV/Elektrolyse-Hybridtechnik zur dezentralen Gewinnung von Brauchwasser aus biologisch gereinigtem Abwasser untersucht und bewertet.

Anhand der Untersuchungsergebnisse lässt sich prinzipiell die elektrochemische Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser bei einer Temperatur von $>6\text{ C}$, einem pH-Wert von $< 8,5$ und einem DOC-Gehalt von $<22\text{ mg L}^{-1}$ als zuverlässiges Verfahren mit hoher Desinfektionsleistung einstufen. Unter diesen Bedingungen wurde bei einer Konzentration an freiem Chlor von $0,4\text{...}0,6\text{ mg L}^{-1}$ und einer Nachwirkzeit von $15\text{...}20\text{ min}$ eine *E.coli*-Reduktion von 4 log-Stufen erzielt. Gleichzeitig wird jedoch auch deutlich, dass niedrige Temperaturen, erhöhte pH-Werte und erhöhte DOC-Gehalte limitierende Parameter dieses Desinfektionsverfahrens zur dezentralen Gewinnung von Brauchwasser darstellen. Zudem erweist sich ein hoher Energieverbrauch der mit bordotierten Diamantelektroden (BDD-Elektroden) ausgestatteten Elektrolysezelle von $2\text{...}2,6\text{ kWh m}^{-3}$ als nachteilig. Des Weiteren ist die Bildung von Chlorat ($c = 1,3\text{ mg L}^{-1}$) und Perchlorat ($c = 18\text{ mg L}^{-1}$) an BDD-Elektroden als kritisch einzuschätzen, da diese Desinfektionsnebenprodukte unter anderem humantoxikologisch relevant sind. Die Konzentration von adsorbierbaren organisch gebundenen Halogenen (AOX) und Trihalomethanen (THM) erwies sich als marginal bis moderat.

Durch den Synergieeffekt der kombinierten Anwendung von UV-Bestrahlung (primäre Desinfektionsmethode) und Elektrolyse können sowohl die dargelegten Nachteile der elektrochemischen Desinfektion als auch der UV-Desinfektion als Einzelverfahren kompensiert werden. Entscheidender Nachteil der UV-Desinfektion ist die Photo- und Dunkelreaktivierung von reversibel UV-geschädigten Bakterien. Es wurde festgestellt, dass die Reaktivierung von reversibel UV-geschädigten *E. coli* selbst bei niedrigen Temperaturen ($T = 10^{\circ}\text{C}$) und stark schwankenden pH-Werten ($\text{pH} = 5,7\text{...}8,1$) sowie bei geringen Lichtintensitäten bzw. im Dunkeln in einem Ausmaß stattfindet, das eine sichere Verwendung und Lagerung des Brauchwassers ausschließt. Der Minimierung der Reaktivierungsprozesse kann zwar durch Erhöhung der UV-Bestrahlungsdosis begegnet werden, jedoch wird dies durch hohe Konzentrationen von abfiltrierbaren Stoffen (TSS) limitiert. Ab einer TSS-Konzentration von 17mg L^{-1} wird, trotz hoher UV-Bestrahlungsdosen von $>400\text{Jm}^{-2}$, keine vollständige *E. coli*-Reduktion erzielt. Somit ist es zwingend erforderlich, die bakterielle Reaktivierung im UV-

behandelten Abwasser zu unterbinden. Dies wurde in der vorliegenden Dissertation durch die elektrochemische Erzeugung von Oxidantien (erfasst als Gesamtoxidantien, GOM) mittels nachgeschalteter Elektrolysezelle untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Photo- und Dunkelreaktivierung durch Gesamtoxidantien in einer Konzentration von 0,5...0,6 mg L⁻¹ bei einer TSS-Konzentration von 8...11 mg L⁻¹ in einem pH-Bereich zwischen 5,7 und 8,1 und einem Temperaturbereich zwischen 10 °C und 30 °C vollständig unterbunden wird (t = 24...72h). Selbst bei hohen Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen bis zu 75 mg L⁻¹ wurde die Reaktivierung der *E. coli* (c_{GOM} = 1,8 mg L⁻¹) und bis zu einer TSS-Konzentration von 32 mg L⁻¹ die Reaktivierung der Gesamtcolidorme (außer *E. coli*, c_{GOM} = 1,0mg L⁻¹) bei hohen Ausgangskeimzahlen von 2...3·10⁵ pro 100 mL vollständig unterbunden. Dabei konnte der geringste Energieverbrauch unter Verwendung von Mischoxid (MOX)-Elektroden realisiert werden. Dieses Ergebnis sowie die Feststellung, dass die unerwünschten Nebenprodukte Chlorat und Perchlorat an MOX-Elektroden nicht gebildet werden, sprechen für den Einsatz dieser Elektroden in der Praxis.

Insgesamt stellt die UV/Elektrolyse-Hybridtechnik bei TSS-Konzentrationen im Bereich von 11...32 mg L⁻¹ eine energieeffiziente Methode (E = 0,17...0,24 kWh m⁻³, MOX-Elektroden) zur Herstellung von Brauchwasser aus biologisch gereinigtem Abwasser dar. Dabei erfüllt das Brauchwasser die Qualitätsanforderungen für eine Vielzahl von Nutzungsarten, angefangen von der landwirtschaftlichen Bewässerung, über innerstädtische/häusliche Anwendungen bis hin zur Freizeitnutzung. Zudem können die Anforderungen der Ablaufklasse +H (100 Fäkalcoliforme (*E. coli*) pro 100mL) zuverlässig eingehalten werden. Die Betriebsstabilität der UV/Elektrolyse-Hybridtechnik sollte ebenfalls innerhalb der erforderlichen Wartungsintervalle (t ≥ 6 Monate) gegeben sein. Der Bildung von unerwünschten Belägen auf Quarzglasoberflächen durch Bioufouling konnte durch elektrolytisch erzeugte Oxidantien über einen Zeitraum von 5,5 Monaten vorgebeugt werden. Diese Beläge können bereits bei einer Gesamtoxidantienkonzentration von 1 mg L⁻¹ vermieden werden.

Die Anwendung der UV-Elektrolyse-Hybridtechnik wird jedoch durch steigende Partikelkonzentrationen und Fäkalbelastungen (*E. coli*-Ausgangskonzentration) limitiert. Der resultierende erhöhte Bedarf an Oxidantien zur Vermeidung der Photo- und Dunkelreaktivierung von Fäkalcoliformen führt zu einer erheblichen Erhöhung des elektrischen Ladungs- und Energieeintrags.